

На правах рукописи

**КОРЧАГИН Геннадий Евгеньевич**

**МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

Специальность: 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань – 2006

Работа выполнена на кафедре радиоастрономии Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский Государственный Университет им. В.И. Ульянова-Ленина»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент КГУ Хуторова О.Г.,  
г. Казань.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор КГЭУ Москаленко Н.И.,  
г. Казань;

доктор физико-математических наук,  
зав. отд. ФГУП ГНЦ ВБ «Вектор» Бородулин А.И.,  
г. Новосибирск;

Ведущая организация: Институт водных и экологических проблем  
СО РАН, г. Барнаул.

Защита диссертации состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_2006 г. в «\_\_\_» часов «\_\_\_» минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском Государственном Университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, физический факультет, ауд. \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_2006 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,  
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.В. Карпов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена эмпирическим исследованиям мезомасштабных процессов в приземном слое атмосферы, нахождению временных и пространственных параметров мезомасштабных вариаций концентрации приземных примесей и метеопараметров. Проводится исследование тонкой пространственно-временной структуры приземного слоя атмосферы. Устанавливается связь интенсивности мезомасштабных волновых вариаций метеопараметров и концентрации приземных примесей с температурной стратификацией.

**Актуальность темы.** В настоящее время одним из актуальных направлений исследований физики атмосферы является изучение тонкой структуры атмосферных примесей для решения ряда фундаментальных и прикладных задач в экологии, климатологии и самой физики атмосферы. Причем наименее изучены мезомасштабные процессы в приземном слое атмосферы и их влияние на неоднородности малых газовых примесей и аэрозолей. Во многих работах по приземному слою атмосферы анализ существующих данных проводился при помощи классического спектрального анализа, который не учитывает квазигармонический характер волновых возмущений концентрации аэрозоля, примесей и метеопараметров приземного слоя атмосферы. Это также обусловило необходимость освещения данных вопросов.

Для изучения волновых вариаций в приземном слое требуется целостный анализ больших массивов данных и длинных временных рядов. Накопленная информация по измерениям малых газовых примесей ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ), аэрозоля и параметров атмосферы в гг. Альметьевск, Казань и Азнакаево за многолетний период позволяет провести такой анализ. В существующих на сегодня работах по исследованию волновых вариаций рассматриваются, как правило, короткие интервалы времени и применяются статистические и спектральные методы. Данные методы подходят для небольших временных рядов стационарного характера и не позволяют дать полную картину изменения спектрального состава колебаний во времени. Таким образом, остается актуальной задача частотно-временного исследования волновых вариаций приземного слоя атмосферы на достаточно больших пространственно-временных масштабах.

**Целью работы** является исследование пространственно-временных закономерностей мезомасштабных волновых процессов с периодами от 5 минут до 24 часов, проявляющихся в вариациях концентрации газовых примесей ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) и аэрозолей и их взаимосвязи со структурой приземного слоя атмосферы.

**Решаемые задачи.** Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- эмпирическое исследование пространственно – временной структуры мезомасштабных волновых неоднородностей атмосферных параметров и концентраций примесей в приземном слое;
- исследование сезонной и пространственной изменчивости мезомасштабных вариаций;

- исследование взаимосвязи амплитуд мезомасштабных вариаций приземных примесей и пространственной структуры метеопараметров приземного слоя атмосферы;
- оценка влияния температурной стратификации на интенсивность мезомасштабных атмосферных неоднородностей.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач базируется на данных длительного эксперимента, использовании методов аппарата Фурье, вейвлет и кросс вейвлет корреляции, с использованием современной технологии вычислительного эксперимента и статистических методах. Основные результаты получены на статистически надежном длительном ряде натурных ежеминутных измерений и проверены путем сравнения с результатами, полученными другими авторами.

**Научная новизна** данной работы заключается в следующем:

1. Впервые с помощью вейвлет анализа исследованы мезомасштабные вариации в многолетних временных рядах концентраций газовых примесей, аэрозоля и параметров приземного слоя и установлен характер интенсивности колебаний концентрации приземных примесей с периодами от 5 минут до 24 часов по сезонам, получены периоды и амплитуды доминирующих волновых возмущений приземного слоя;
2. Впервые определены пространственные характеристики мезомасштабных волновых процессов в приземном слое атмосферы по уникальным синхронным экспериментальным измерениям концентрации аэрозоля, примесей и метеопараметров;
3. Впервые проведены исследования связи интенсивности вариаций концентрации приземных примесей, мезомасштабных атмосферных волн и температурной стратификации приземного слоя атмосферы.

**На защиту выносятся:**

1. Экспериментальные распределения периодов волновых возмущений атмосферных примесей и метеопараметров приземного слоя с временными масштабами от 5 минут до 24 часов.
2. Найденные пространственные характеристики параметров волновых мезомасштабных возмущений в приземном слое атмосферы – горизонтальные фазовые скорости и длины волн.
3. Сезонные зависимости амплитуд мезомасштабных вариаций температуры, относительной влажности, давления, модуля скорости ветра, а также концентрации аэрозоля и других приземных примесей ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ).
4. Обнаруженная связь вариаций интенсивности мезомасштабных волновых возмущений концентрации аэрозоля, примесей и метеопараметров.
5. Связь температурной стратификации приземного слоя и интенсивности мезомасштабных вариаций концентрации атмосферных примесей и метеопараметров.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена статистической надежностью многолетних наблюдений на 5 автоматизированных станциях, расположенных в г. Альметьевске, а также в гг. Казани и Азнакаево. Основные

результаты исследования получены на основе трехлетних данных по ежеминутным измерениям концентрации примесей и метеопараметров в приземном слое атмосферы. Для всех полученных усредненных значений рассчитаны доверительные интервалы, для коэффициентов корреляции определены уровни значимости.

**Практическая ценность работы.** Полученные характеристики мезомасштабных волновых возмущений метеопараметров и концентраций примесей позволяют описать структуру волновых процессов в приземном слое. Обнаруженные частотно-временные закономерности поведения волновых возмущений параметров атмосферы в приземном слое позволяют учесть их влияние в динамических моделях атмосферы и различных прикладных задачах. Эти результаты можно использовать для дополнительного учета влияния волновых вариаций неоднородностей концентраций примесей в исследованиях динамики и прогноза тонкой структуры пространственно-временных вариаций атмосферных загрязнений. Полученные результаты имеют дополнительную практическую ценность, поскольку обладают высокой статистической достоверностью ввиду использования экспериментальных данных продолжительного, непрерывного мониторинга состояния атмосферного воздуха.

**Личный вклад автора.** Автором лично были выполнены исследования поставленных вопросов аналитическими и численными методами. Им выбрана и реализована специальная методика обработки данных, проведены расчеты, проанализированы полученные результаты и сделаны основные выводы.

**Апробация результатов.** Результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной аэрозольной конференции им. проф. Сутугина А.И., Москва-2000; Конференции VII Рабочей группы «Аэрозоли Сибири», Томск-2000; Conference on Visibility, Aerosol and Atmospheric Optics, Vienna-2000; Conference of the American Association for Aerosol Research, USA-2000; European Aerosol Conference, Leipzig-2001, Germany; IV Республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов РТ, Казань-2001; Конференции VIII Рабочей группы «Аэрозоли Сибири», Томск-2001; II Итоговой конференции Республиканского конкурса научных работ им. Н.И. Лобачевского, Казань-2002; Конференции IX Рабочей группы «Аэрозоли Сибири», Томск-2002; Конференции X Рабочей группы «Аэрозоли Сибири», Томск-2003; Научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов КФТИ КазНЦ РАН, Казань-2004; XI Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск-2004; Конференции XII Рабочей группы «Аэрозоли Сибири», Томск-2005; а также на научных семинарах и конференциях Казанского государственного университета (2001-2006 гг.)

Работа по этому направлению была удостоена именной стипендии мэра г. Казани среди студенческих и аспирантских работ в 2001 г. Автор являлся ответственным исполнителем проекта, поддержанного фондом Министерства Образования Российской Федерации № А03-2.13-597. Принимал участие в качестве исполнителя в исследованиях, поддержанных грантами: РФФИ №№ 01-05-64390, 03-05-96211, 04-05-64194, НИОКР РТ № 09-9.5-165.

**Публикации.** Автором опубликована по теме диссертации 21 работа. Из них 7 статей в научных журналах, 2 статьи в сборниках трудов научных

конференций, 12 опубликованных тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 125 страниц печатного текста, в том числе 30 рисунков, 4 таблицы. Список литературы содержит 138 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов работы, изложена структура работы.

**В первой главе** представлен обзор современных работ, имеющих отношение к исследуемой проблеме – мезомасштабным вариациям атмосферных параметров и примесей в приземном слое. Показано, что свойства атмосферы и ее параметры – температура, плотность, химический состав, давление, режим циркуляции – существенно меняются во времени и пространстве. Эти изменения имеют широкий временной и пространственный спектр.

Несмотря на возрастающий интерес к приземному слою атмосферы пока малоизученной областью остается исследование мезомасштабных волн, особенно в приземном слое, где энергетика различных волн может сильно отличаться от модельных представлений в силу влияния подстилающей поверхности и турбулентных процессов.

Исходя из вышесказанного, требуется с большой статистической надежностью исследовать в приземном слое мезомасштабные неоднородности атмосферных примесей, сравнить закономерности их развития с тонкой структурой полей метеопараметров и температурной стратификацией. Это дает возможность выявить основные механизмы формирования пространственно-временной структуры атмосферных примесей, в том числе аэрозоля, в приземной атмосфере.

**Во второй главе** проведено обоснование методов анализа временных рядов применяемых для исследования мезомасштабных атмосферных вариаций. Рассмотрены как традиционные (преобразование Фурье), так и сравнительно новые (вейвлет преобразование) методы анализа.

Вейвлет преобразование (ВП) функции  $f(t)$  определяется в виде:

$$(W_{\psi} f)(b, a) = \gamma \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt,$$

где  $W_{\psi}$  — оператор вейвлет преобразования,  $a$  – масштаб,  $a \neq 0$ ,  $b$  — временной сдвиг,  $a, b \in \mathbf{R}$  ( $\mathbf{R}$  — множество действительных чисел),  $\psi(t)$  — вейвлет функция,  $\bar{\psi}$  обозначает комплексное сопряжение  $\psi$ ,  $\gamma$  — нормализующий множитель.

Для вейвлет анализа нами был выбран вейвлет Морле:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} e^{i\Omega t}.$$

исходя из следующих соображений: 1) он хорошо приспособлен для анализа квазипериодических процессов, так как имеет хорошую локализацию в частотном пространстве; 2) комплексный вейвлет позволяет анализировать не только

амплитуду, но и фазу процесса; 3) материнская функция представляет собой периодический сигнал, модулированный функцией Гаусса, поэтому мы можем сопоставить вейвлет спектру спектру атмосферных волн, являющихся собственными колебаниями атмосферы, которые принято считать квазипериодическими; 4) значимость не зависит от масштаба (периода в терминах классического Фурье-анализа) анализируемого сигнала. Исследовано влияние шума, определены доверительные оценки.

Было проведено вычисление коэффициентов локальной кросс вейвлет корреляции, которая для фиксированного запаздывания  $\theta$  определяется для всех точек ВП следующим образом:

$$\hat{\gamma}_{1,2}(t, a, \theta) = \frac{\int_{t-a/2}^{t+a/2} \Psi_1(a, \tau) \cdot \Psi_2(a, \tau + \theta) d\tau}{\left[ \left( \int_{t-a/2}^{t+a/2} \Psi_1^2(a, \tau) d\tau \right) \cdot \left( \int_{t-a/2}^{t+a/2} \Psi_2^2(a, \tau + \theta) d\tau \right) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

где  $t$  – время,  $a$  – масштаб,  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – вейвлет преобразования сигналов  $s_1$  и  $s_2$ . Кратко изложены положения спектрального анализа применительно к временным рядам. Рассмотрена методика частотно-временного анализа временных рядов с привлечением аппарата вейвлет преобразований и дано обоснование применения этого метода с учетом доверительных оценок уровней значимости. Рассмотрены основные характеристики вейвлета Морле и показано, что выбор этого вейвлета в качестве базисной функции является оптимальным для исследования мезомасштабных атмосферных вариаций.

Показано применение метода вейвлет преобразования для анализа суточных и мезомасштабных флуктуаций параметров атмосферы, имеющих нестационарный характер. Для исследования связи мезомасштабных атмосферных процессов и вариаций приземных примесей выбран аппарат кросс вейвлет корреляции.

**В третьей главе** приводится описание использованных в работе данных с 5-ти автоматизированных измерительных станций мониторинга, находящихся в городе Альметьевске, а также со станции г. Азнакаево. Все величины измерялись на высоте 2,4 м с интервалом времени 1 мин. Точность измерения температуры – 0,1 градуса, точность измерения влажности – 1%, давления – 2 мм. рт. ст., точность измерения ветра – 0,1 м/с, точность измерения направления ветра – 2,5 градуса.

Измерение концентрации окислов азота производится газоанализатором непрерывного действия, основанном на принципе хемилюминесценции. Точность измерений – 1 ppb при времени измерения 60 сек.

Работа анализатора для измерений концентраций  $\text{SO}_2$  основана на принципе ультрафиолетовой флуоресценции. Точность измерения – 1 ppb.

Метод измерения массовой концентрации аэрозоля основан на поглощении бета-излучения при прохождении через фильтр. Точность измерения – 1 мкг/м<sup>3</sup>.

При решении задач выделения мезомасштабных вариаций с периодами 1-24 час. проводилось усреднение индивидуальных измерений за 30 мин. Из полученных усредненных значений для каждой компоненты примесей

сформированы длинные временные ряды. В работе мы использовали банк данных всех вышеперечисленных величин за период с 1 октября 1996 г. по 25 декабря 1999 г. для г. Альметьевск. При исследовании связи стратификации атмосферы и интенсивности мезомасштабных вариаций были использованы данные г. Азнакаево за 2001 г. и данные радиозондовых наблюдений для региона г. Казани за этот же период. При радиозондовых наблюдениях соответственно точность измерения давления составляет  $\pm 2$  мб., температуры  $\pm 1$  °С, относительной влажности  $\pm 5\%$ .

Станции, расположенные в г. Альметьевске, находятся в черте города и пространственно разнесены на расстояния от 0,9 до 6,3 км.

На рис. 1 представлено распределение вероятностей горизонтальных составляющих фазовых скоростей  $C_x$  волн с периодами 5 мин до 1 часа. Видно, что горизонтальные фазовые скорости большей части зарегистрированных мезомасштабных волн лежат в интервале 0-40 м/с, причем наиболее вероятные значения горизонтальных фазовых скоростей имеют величины от 5 до 15 м/с.

Значение вероятности при этом достигает 0,3. Заметим, что такие же величины горизонтальных фазовых скоростей получены радиометеорным методом в верхней атмосфере. Это позволяет предположить существование вертикально распространяющегося волнового возмущения.

Рассматривая спектр длин волн (рис. 2), можно заметить, что большая часть мезомасштабных волн имеет длины волн вплоть до 15 км. Наиболее вероятные длины волн 3-7 км. При этом вероятность достигает значения 0,3. Другими словами, 30% зарегистрированных мезомасштабных волн с периодами 5-60 мин имеют длины волн 3-7 км. Для масштабов от 1 до 16 часов характерные длины волн составляют 2-30 км, а фазовые скорости, как правило, меньше 10 м/с. Во время распространения мезомасштабные волны модулируют вариации концентрации аэрозоля, атмосферных примесей и метеопараметров. Таким образом, в атмосфере происходит формирование неоднородностей концентрации аэрозоля и различных примесей с масштабами, имеющими порядок длин мезомасштабных волн. Получается, что наибольшую вероятность имеют неоднородности с размерами 3-7 км, как это и было установлено по экспериментальным данным сети станций в г. Альметьевск.

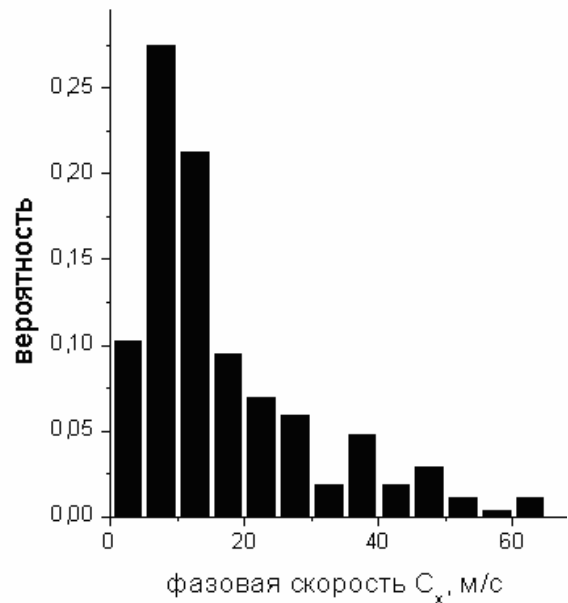


Рис. 1. Гистограмма горизонтальных составляющих фазовых скоростей волн с периодами 5-60 мин., полученная по данным г. Альметьевск за период 01.10.96-25.12.96 г.



Из распределения вероятностей периодов мезомасштабных волн с периодами 5 мин – 1 час (рис. 3), следует, что большая часть наблюдаемых мезомасштабных волн имеет величину периода 6-11 минут. Вероятность появления волн с такими периодами составляет 35%.

В работе результаты вейвлет преобразований представлены в следующем виде: по оси  $x$  отложено время в часах, с интервалом, равным 24 часа. Ось  $y$  представляет собой ось масштабов вейвлет преобразования, соответствующим периодам мезомасштабных вариаций от 1 до 30 часов. Градацией уровней серого цвета представлены модули вейвлет коэффициентов, максимальные значения которых соответствуют амplitудам мезомасштабных вариаций. Минимальное значение коэффициентов соответствует белому цвету, максимальное – черному. Самый светлый серый цвет показывает уровень значимости, т.е. более темные области являются значимыми с вероятностью 90 %. Размерности анализируемых величин следующие: давление представлено в мм. рт. ст., температура – в  $^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность – в %, модуль скорости ветра – в м/с, концентрация – в  $\text{мкг}/\text{м}^3$  или в  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

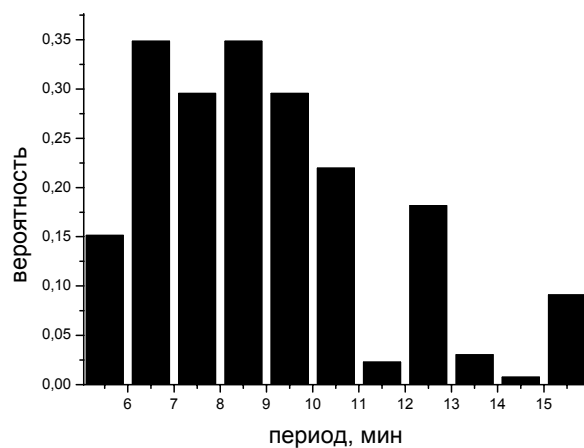


Рис. 3. Гистограмма периодов волн с масштабами 5 мин. до 1 часа.

периоду 24 часа.

Для вейвлет представления ряда температуры (temp) характерны следующие закономерности. Наряду с доминирующей суточной компонентой, здесь присутствуют компоненты с периодами 16, 12, 8 и 4 часа. Они также являются значимыми, хотя их интенсивность ниже по сравнению с суточной компонентой.

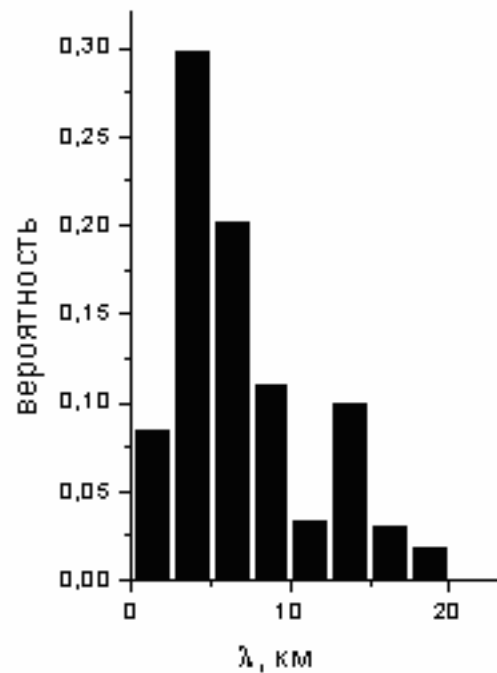


Рис. 2. Гистограмма длин волн с периодами 5-60 мин., полученная по данным г. Альметьевск за период 01.10.96-25.12.96 г.

На рис. 4 представлены характерные результаты вейвлет преобразования температуры (temp), модуля скорости ветра (sw), концентрации аэрозоля (ae) и двуокси азота ( $\text{NO}_2$ ) за осенний период 16 сентября – 9 октября 1997 года. Из рисунка видно, что в вариациях всех 4-х параметров присутствует ярко выраженная суточная компонента, соответствующая

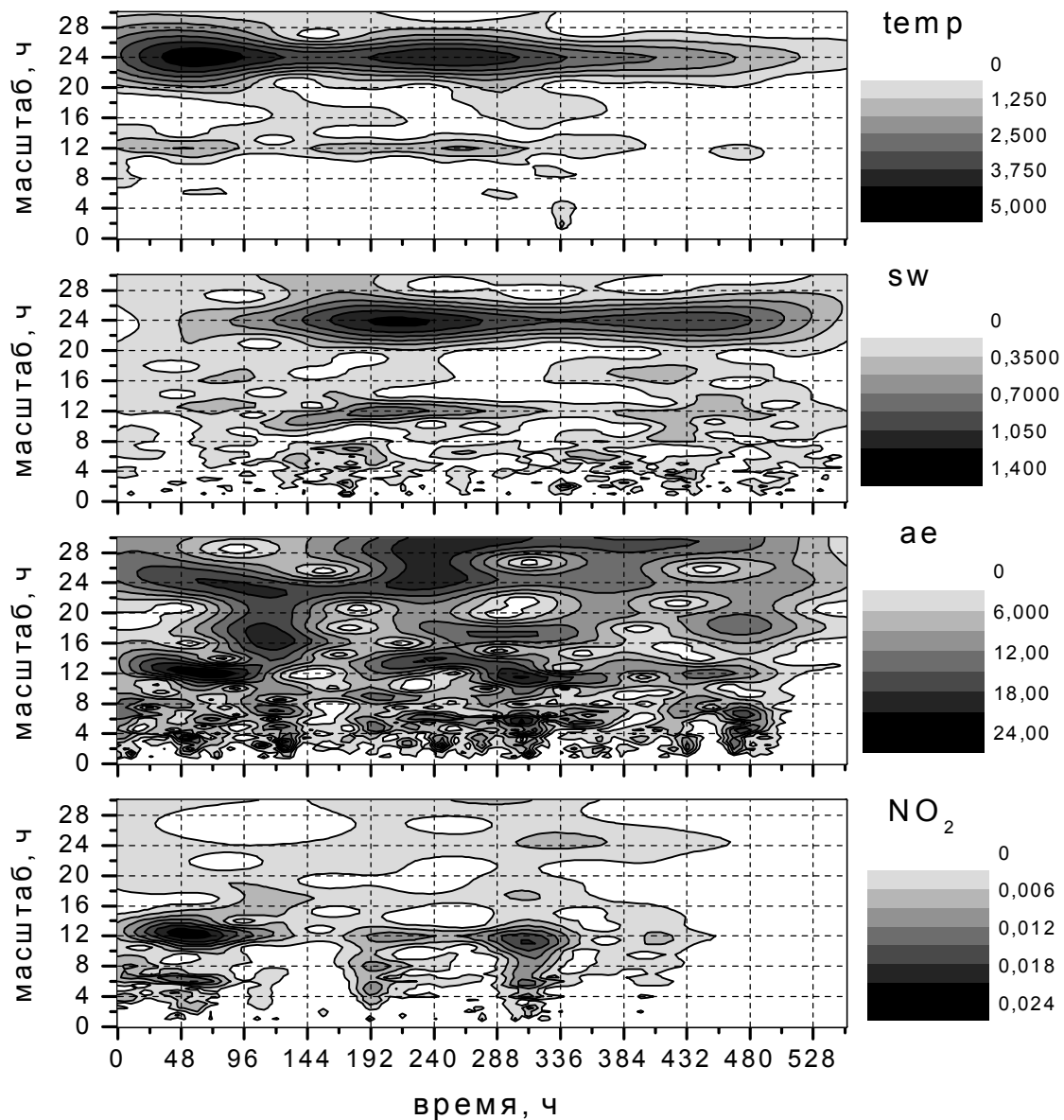


Рис. 4. Модули вейвлет преобразований временных рядов температуры (temp), скорости ветра (sw), концентрации аэрозоля (ae) и концентрации двуокиси азота (NO<sub>2</sub>) за период 16.09.97-09.10.97 (осень).

Картина для скорости ветра (sw) имеет более сложный вид. Но здесь также присутствуют компоненты с периодами 24, 16, 12, 8 и 4 часа. Сравнивая вейвлет преобразования температуры и скорости ветра, видим, что, как и следовало ожидать, мелкомасштабные вариации с периодами, меньшими 12 часов, для скорости ветра выражены сильнее. Как правило, неоднородности с большими масштабами имеют большую продолжительность по времени.

Вейвлет представление для концентрации аэрозоля (ae) интерпретировать значительно сложнее по сравнению с другими параметрами, что объясняется сложной зависимостью концентрации аэрозоля от температуры, давления, скорости ветра и относительной влажности. Но здесь также, наряду с другими, можно выделить указанные выше периоды.

Как видно, мезомасштабные вариации концентрации аэрозоля в этот период (16.09.97-09.10.97) достигают значения 24 мкг/м<sup>3</sup> и имеют продолжительность до

3-х суток. Вариации концентрации двуокиси азота ( $\text{NO}_2$ ) принимают значение до  $0,024 \text{ мг/м}^3$  и имеют хорошо заметные периоды 24, 16, 12, 8 и 4 часа, продолжительность наиболее сильных вариаций составляет от 3-4 суток для периода 24 часа, до суток и ниже для более мелких масштабов.

Амплитуда мезомасштабных вариаций температуры составляет  $5^\circ\text{C}$ , модуля скорости ветра –  $1,4 \text{ м/с}$ .

В результате анализа данных выявлены моды вариаций параметров атмосферы. Получено, что в исследованном интервале периодов выявляются возмущения с временными масштабами от 5 мин до 24 ч. Причем возмущения, имеющие одинаковый масштаб, наблюдаются одновременно в концентрациях аэрозоля и всех газовых примесей ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ). Сравнение вейвлет представлений аэрозоля, газовых примесей и метеопараметров показывает, что мезомасштабные вариации концентраций всех примесей соответствуют вариациям скорости ветра. Следовательно, мезомасштабные вариации атмосферных примесей определяются динамикой. В температуре наиболее сильно проявляются суточные и полусуточные вариации, а не мезомасштабные.

Определены характерные амплитуды мезомасштабных флуктуаций малых газовых примесей, массовой концентрации аэрозоля, метеопараметров (см. таблицу 1).

Таблица 1.

Среднесезонные амплитуды мезомасштабных вариаций метеопараметров и атмосферных примесей, полученные по данным станции г. Альметьевск (1.10.96- 25.12.99)

Величина	Зима	Весна	Лето	Осень
температура ( $^\circ\text{C}$ )	3,1	4,4	6,9	3,7
относительная влажность (%)	4,0	14,1	26,5	13,2
модуль скорости ветра (м/с)	1,0	1,3	1,0	1,1
окись азота ( $\text{мкг/м}^3$ )	15	8	6	16
двуокись азота ( $\text{мкг/м}^3$ )	16	21	12	20
двуокись серы ( $\text{мкг/м}^3$ )	5	2	5	3
окись углерода ( $\text{мг/м}^3$ )	1,6	0,2	0,3	0,5
аэрозоль ( $\text{мкг/м}^3$ )	12	48	48	59
сероводород ( $\text{мкг/м}^3$ )	1,4	1,2	1,2	2,6

Полученные результаты для метеопараметров находятся в хорошем согласии со значениями, полученными другими авторами независимыми методами. Что касается мезомасштабных флуктуаций концентрации примесей, то они, в основном, являются оригинальными.

Обнаружено, что повышение активности мезомасштабных флуктуаций концентрации аэрозоля наблюдается в периоды, предшествующие фронтам понижения или повышения давления.

Приведена оценка для угла астрономической рефракции, вызванной мезомасштабными волновыми вариациями в приземном слое атмосферы.

**В четвертой главе** были проанализированы связи интенсивности мезомасштабных вариаций примесей и метеопараметров. В данной главе

рассчитаны коэффициенты локальной кросс вейвлет корреляции соответствующих рядов массовой концентрации аэрозоля, окиси и двуокиси азота, окиси углерода, сероводорода, диоксида серы, а также рядов относительной влажности, давления, температуры и скорости ветра.

В качестве примера на рис. 5 представлена характерная картина результатов кросс вейвлет анализа при прохождении фронта давления. Ограничимся временным периодом 2 недели, т.е. 14 суток. Данный рисунок представляет собой временной ряд давления в мм. рт. ст. и кросс вейвлет преобразования массовой концентрации аэрозоля с модулем скорости ветра (5б) и относительной влажностью (5в), за период 16.06.98-30.06.98. На рис. 5б и 5в цветом показано значение кросс вейвлет корреляции: черным – сильная положительная (0,67 - 1); белым – сильная отрицательная (от -0,67 до -1) светло-серым – нулевая и слабая (-0,67-0,67). В указанный период, как видно из рисунка, проходит фронт давления с 20 по 22.06.98. При этом давление падает с 757 до 740 мм. рт. ст.

Во время прохождения фронта давления наблюдается значимая сильная отрицательная кросс вейвлет корреляция, как суточных, так и значимых мезомасштабных вариаций относительной влажности и концентрации аэрозоля (рис. 5в) в широком диапазоне периодов (4-18 часов). При этом надо заметить, что в периоды стабилизации давления кросс вейвлет корреляция указанных параметров становится преимущественно сильной положительной.

Также при прохождении фронта давления наблюдается смена знака коэффициентов кросс вейвлет корреляции массовой концентрации аэрозоля с модулем скорости ветра и относительной влажностью для значимых с 90 % вероятностью вариаций большинства периодов (см. в качестве примера рис. 5б,в). Аналогичные зависимости наблюдаются для кросс вейвлет корреляции остальных примесей с модулем скорости ветра и относительной влажностью.

Показано, что коэффициент локальной кросс вейвлет корреляции концентрации аэрозоля с давлением, температурой и влажностью динамически изменяется от +1 до -1. При этом значимые значения достигаются для значимых по амплитуде квазипериодических вариациях в каждом из исследуемых параметрах (см. рис. 5). Прохождение фронта давления часто связано со сменой воздушных масс. Поэтому знак кросс вейвлет корреляции массовой концентрации аэрозоля с относительной влажностью, величиной скорости ветра меняется на обратный. То же характерно для малых газовых примесей.

Рассчитаны коэффициенты локальной кросс вейвлет корреляции волновых вариаций массовой концентрации аэрозоля и других примесей и метеопараметров в приземном слое атмосферы. Получено, что значимые вариации приземных примесей имеют сильную связь с вариациями модуля скорости ветра и относительной влажности, причем знак связи зависит от фронтов давления, типа воздушных масс и модулируется крупномасштабной атмосферной циркуляцией. Установлена сильная отрицательная кросс вейвлет корреляция (от -0,6 до -1) температуры и относительной влажности с модулем скорости ветра на масштабах 1-24 часа при прохождении фронта давления.

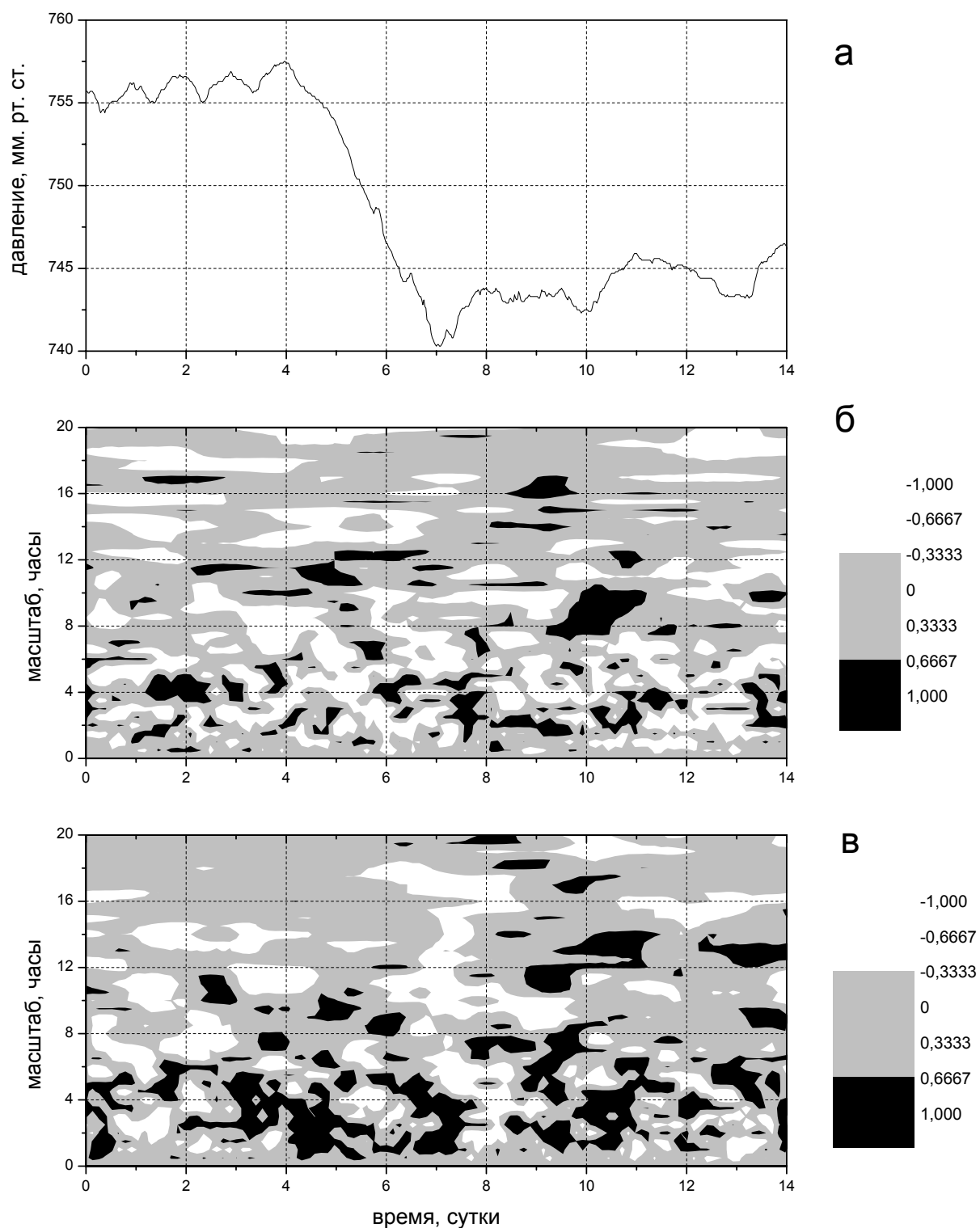


Рис. 5. Временной ряд давления (а), кросс вейвлет преобразования модуля скорости ветра и относительной влажности с массовой концентрацией аэрозоля (б, в) за период 16.06.98-30.06.98.

Для проверки влияния условий стратификации на интенсивность мезомасштабных волновых вариаций в приземном слое атмосферы были проведены соответствующие расчеты и проанализированы высотная и временная структуры атмосферы за 2001 г.

На рис. 6 в качестве примера представлен высотный профиль температуры,

полученный методом радиозондирования в г. Казани за период 27.10.2001-05.11.2001 г. Интервал измерений – сутки, диапазон изменения высоты – 1 км, шаг измерений по высоте – 100 м. На рисунке приведены данные за 10 суток. Каждые сутки представлены своей кривой с обозначенными экспериментальными точками.

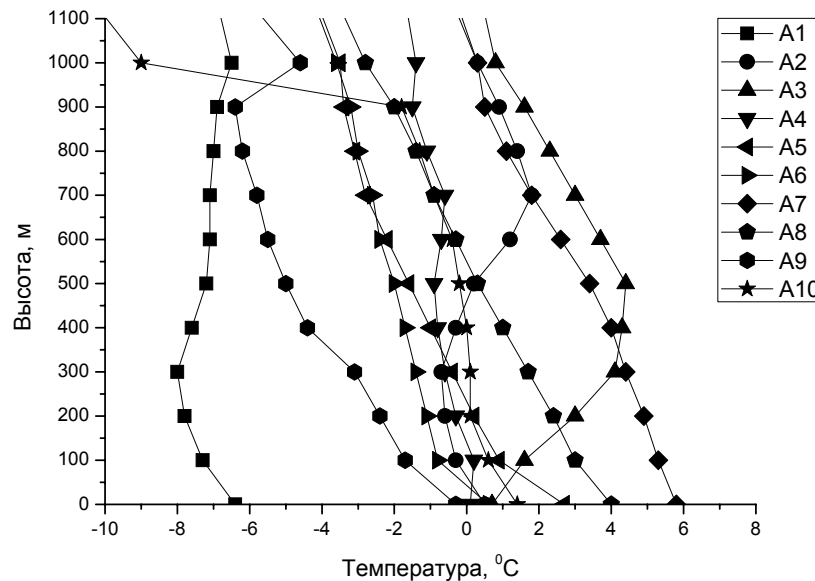


Рис. 6. Высотный профиль температуры по данным радиозондирования в районе г. Казани за период 27.10.2001-05.11.2001 г.

На основе высотного профиля температуры построен график температурной стратификации за соответствующий период (см. рис. 7а). На графике пунктиром отмечены нулевой уровень инверсии температуры (устойчивой стратификации) и средний уровень -  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ .

Анализируя рисунок можно сделать вывод, что в рассматриваемый период наблюдалась как устойчивая, так и неустойчивая стратификация. Устойчивая стратификация наблюдалась на 2-4, 7, 10-11 и 13 сутках. В остальное время стратификация была неустойчивой.

На рис. 7б, в и г представлены вейвлет преобразования модуля скорости ветра, относительной влажности и температуры по данным станции г. Азнакаево за тот же период 27.10.2001-07.11.2001. Для всех параметров рассчитаны уровни 90% значимости, которые имеют следующие значения: для вейвлет преобразования модуля скорости ветра –  $0,31\text{ м/с}$ ; относительной влажности –  $1,04\text{ }\%$ ; температуры –  $0,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При расчетах выяснилось, что амплитуда вариаций концентрации окиси углерода при устойчивой стратификации на  $9\text{ }\%$  превышает амплитуду вариаций при неустойчивой стратификации. Амплитуда вариаций двуокиси и окиси азота при устойчивой стратификации на  $56\text{ }\%$  превышает амплитуду вариаций при неустойчивой стратификации. А амплитуда вариаций модуля скорости ветра незначительно больше.

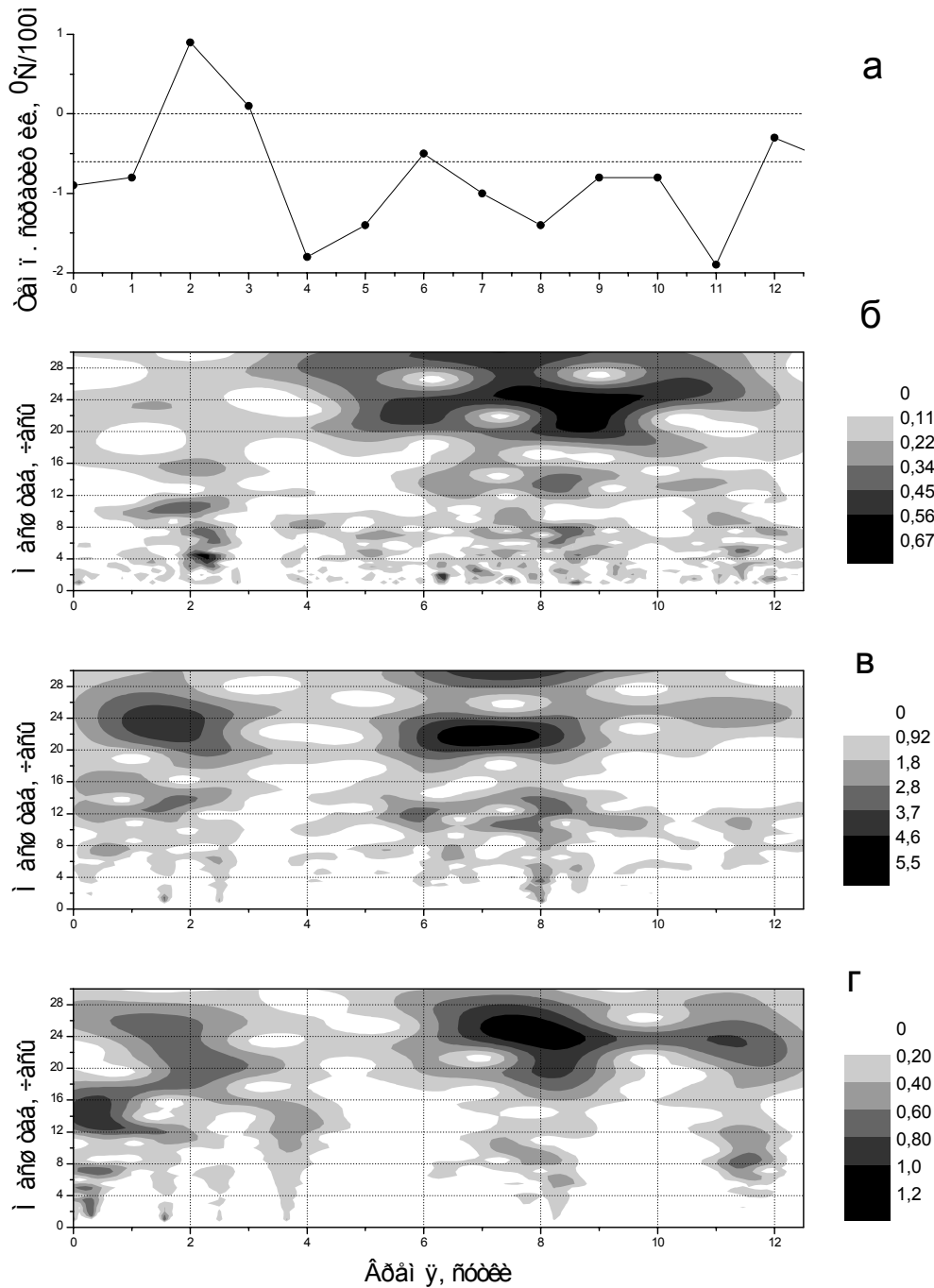


Рис. 7. Температурная стратификация и вейвлет преобразования модуля скорости ветра, относительной влажности и температуры по данным станции Азнакаево за период 27.10.2001-07.11.2001.

Суточный ход метеопараметров является не волновым, а вынужденным процессом, вызванным влиянием нагрева подстилающей поверхности. Суточный ход концентраций всех примесей также является вынужденным процессом, вызванным совместным влиянием антропогенных и метеорологических факторов, имеющих суточные вариации. Поэтому при сравнении с условиями стратификации в вейвлет представлениях мы рассматривали только интенсивность вариаций с периодами 1-16 час.

При годичном исследовании влияния стратификации на мезомасштабные

волновые вариации метеопараметров всех примесей, кроме окиси углерода установлено, что максимумы интенсивности значимых волновых вариаций наблюдаются при устойчивой стратификации. При неустойчивой стратификации интенсивность волновых вариаций для этих примесей мала. Это показывает, что мезомасштабные вариации СО, источником которого является в основном транспорт, видимо, не зависят от условий стратификации.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

1. В результате исследования закономерностей в мезомасштабных колебаниях параметров приземного слоя атмосферы и атмосферных примесей построены эмпирические распределения их периодов и получено, что мезомасштабные волновые процессы в приземном слое атмосферы имеют характерные периоды 6-11 минут 2-5, 8, 13 часов;
2. Построены фазовые фронты мезомасштабных волн и рассчитаны их характерные фазовые скорости, принимающие значения до 40 м/с, периоды и длины волн (от 1 до 15 км). Анализ спектра длин волн мезомасштабных возмущений показал, что в атмосфере формируются неоднородности концентрации загрязняющих примесей с характерными размерами до 15 км и имеют наиболее вероятные значения 3-7 км.
3. Рассчитаны коэффициенты локальной кросс вейвлет корреляции волновых вариаций концентрации примесей и метеопараметров в приземном слое атмосферы. Установлена сильная отрицательная кросс вейвлет корреляция (от -0,6 до -1) мезомасштабных и суточных вариаций температуры и относительной влажности с модулем скорости ветра при прохождении фронта давления. Получено, что значимые вариации приземных примесей имеют сильную связь с вариациями модуля скорости ветра и относительной влажности, причем знак связи зависит от фронтов давления, типа воздушных масс, то есть модулируется крупномасштабной атмосферной циркуляцией.
4. При исследовании влияния температурной стратификации на мезомасштабные волновые вариации метеопараметров и некоторых примесей с периодами от 5 минут до 16 часов установлено, что максимумы интенсивности значимых волновых вариаций наблюдаются, в основном, при устойчивой стратификации. При неустойчивой стратификации интенсивность волновых вариаций для этих примесей мала. Для окиси углерода, основным источником которого является в основном транспорт, мезомасштабные вариации, видимо, не зависят от условий стратификации. Также амплитуда вариаций модуля скорости ветра слабо возрастает при устойчивой стратификации.



## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хуторова О.Г. Исследование пространственной структуры мезомасштабных вариаций тропосферного аэрозоля различными методами / О.Г. Хуторова, Г.Е. Корчагин // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14, № 06-07. – С. 630-632.
2. Khoutorova O.G. Waves in air impurities and their influence on atmospheric optical properties / O.G. Khoutorova, D.N. Douryagin, A.A. Vasilyev, G.E. Korchagin // Atmospheric Environment. – 2001. - V. 35, № 30. - P. 5131-5134.
3. Khoutorova O.G. Method of investigation atmospheric waves by the net of impurities concentration measurements / O.G. Khoutorova, G.E. Korchagin // Environmental radioecology and applied ecology. – 2000. - V. 6, № 2. - P. 11-16.
4. Khoutorova O.G. Mesoscale fluctuation in atmospheric aerosols / O.G. Khoutorova, G.E. Korchagin // Journal of Aerosol Sciences. - 2001. - V. 32, № S1. – P. 731-732.
5. Korchagin G.E. Time localization of interrelation of mesoscales fluctuations of meteoroparameters / G.E. Korchagin, O.G. Khoutorova // Environmental radioecology and applied ecology. – 2005. - V. 11, № 3. - P. 3-9.
6. Khoutorova O.G. Study of the spatial structure of mesoscale variations of near-ground aerosol by different methods / O.G. Khoutorova, G.E. Korchagin // Atmos. Oceanic. Opt. – 2001. - V. 14, № 6-7. - P. 577-579.
7. Хуторова О.Г. Пространственная структура мезомасштабных вариаций тропосферного аэрозоля / О.Г. Хуторова, А.А. Журавлев, Г.Е. Корчагин // Труды НИХФИ. - М: НИХФИ, 2000. - С. 167-171.
8. Корчагин Г.Е. Исследование мезомасштабных вариаций параметров атмосферы по данным сети станций экологического мониторинга / Г.Е. Корчагин // Труды общедисциплинарного научного физического семинара студентов. - Казань: КГУ, 2001. - С. 61-66.
9. Корчагин Г.Е. Исследование локальных характеристик мезомасштабных процессов в приземном слое атмосферы / Г.Е. Корчагин // Сборник трудов конференции молодых ученых КФТИ КНЦ РАН. – Казань: КФТИ, 2006. - С. 40-45.
10. Корчагин Г.Е. Применение аппарата кросс вейвлет анализа для расчета локальных характеристик мезомасштабных процессов в атмосфере / Г.Е. Корчагин // Сборник трудов молодых ученых и преподавателей КЮИ МВД России. – Казань: КЮИ МВД России, 2006. – С. 117-121.
11. Хуторова О.Г. Исследование пространственной структуры мезомасштабных вариаций тропосферного аэрозоля различными методами / О.Г. Хуторова, Г.Е. Корчагин // Тез. VII Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2000. - С. 49.
12. Khoutorova O.G. Mesoscale Wave Disturbances in the Tropospheric Aerosol / O.G. Khoutorova, G.E. Korchagin, A.A. Vasilyev // AAAR Abstracts. – USA, 2000. - P. 416.

13. Khoutorova O.G. Waves in air impurities and their influence on atmospheric optical properties / O.G. Khoutorova, D.N. Douryagin, A.A. Vasilyev, G.E. Korchagin // Conference on aerosol Atmospheric Optics Abstracts. – Vienna, 2000. – P. 49-50.
14. Корчагин Г.Е. Исследование мезомасштабных вариаций параметров атмосферы по данным сети станций экологического мониторинга / Г.Е. Корчагин // Тезисы докладов студенческой научной конференции физического факультета Казанского государственного университета. – Казань: КГУ, 2001. – С. 20.
15. Khoutorova O.G. Air pollution's mesoscale fluctuations in the urban region of Eastern Europe / O.G. Khoutorova, G.E. Korchagin // AAC 2001 Abstracts. - Taipei: AAC, 2001. - P. 836.
16. Khoutorova O.G. Investigation of mesoscale disturbances in the tropospheric aerosol by wavelet analysis / O.G. Khoutorova, G.E. Korchagin // AAAR Abstracts. – Portland: USA, 2001. - P. 106.
17. Хуторова О.Г. Климатология мезомасштабных флуктуаций приземного аэрозоля в урбанизированных условиях / О.Г. Хуторова, Г.Е. Корчагин // Тез. VIII Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2001. - С. 84.
18. Корчагин Г.Е. Мезомасштабные флуктуации коэффициента преломления приземного слоя атмосферы и их вейвлет анализ / Г.Е. Корчагин, О.Г. Хуторова // Тез. IX Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2002. - С. 26.
19. Хуторова О.Г. Взаимосвязь мезомасштабных флуктуаций атмосферных примесей и метеопараметров / О.Г. Хуторова, Г.Е. Корчагин // Тез. X Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2003. - С. 46.
20. Korchagin G.E. Time localization of interrelation of mesoscales fluctuations of meteoroparameters / G.E. Korchagin, O.G. Khutorova // XI Joint International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Abstracts. – Tomsk, 2004. - P. 176.
21. Корчагин Г.Е. Временная локализация взаимосвязи мезомасштабных флуктуаций метеопараметров и массовой концентрации аэрозоля / Г.Е. Корчагин, О.Г. Хуторова // Тез. XII Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2005. - С. 38.